

CONTRIBUTOS PARA A MELHORIA DA DURABILIDADE E SUSTENTABILIDADE DE ARGAMASSAS E BETÕES - AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE DE POZOLANAS ARTIFICIAIS

Jorge Pontes¹, António Santos Silva² e Paulina Faria³

1: Departamento de Engenharia Civil
Instituto Superior Técnico
Universidade Técnica de Lisboa
Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal
e-mail: jorgempontes@gmail.com

2: Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Avenida do Brasil 101, 1700-066, Lisboa, Portugal
e-mail: ssilva@lnec.pt

3: Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa
2829-516 Caparica
e-mail: paulina.faria@fct.unl.pt

Palavras-chave: Pozolanas, Ensaios de Reatividade, Sustentabilidade, Argamassas, Betões

Resumo. *Materiais ricos em sílica e/ou alumina reativas, e com granulometria fina, podem ser utilizados, em geral, como pozolanas em argamassas e betões. Esses materiais podem contribuir para a otimização das argamassas e dos betões, na medida em que lhes conferem uma melhoria das suas características, em particular, aumentam a sua durabilidade e campo de aplicação.*

Os materiais pozolânicos podem ser de origem natural ou artificial, incluindo-se neste grupo alguns subprodutos industriais. As pozolanas naturais necessitam apenas de um tratamento de moagem; já as artificiais são obtidas, em geral, após tratamentos térmicos, e por vezes também de moagem. A utilização de pozolanas provenientes de subprodutos industriais ou outros resíduos permite atingir vários objetivos: por um lado, uma valorização desses resíduos, que deixam de ter de ser depositados em aterro, contribuindo em termos ambientais, e também na sustentabilidade da construção, já que quando utilizados em substituição parcial dos ligantes, promovem a economia de recursos naturais e energéticos.

De forma a poder-se avaliar a viabilidade do tratamento e utilização de materiais com características pozolânicas, interessa aferir a sua reatividade em presença de hidróxido de cálcio. Na bibliografia são descritos vários métodos para determinar este parâmetro. No entanto, a sua viabilidade para cada tipo de pozolanas não está ainda devidamente estabelecida e a sua utilização necessita de ser bem fundamentada. Este trabalho pretende dar contributos nessa perspetiva, tendo-se para tal efetuado o levantamento dos diversos métodos existentes e aferido a sua viabilidade por aplicação à caracterização de diferentes tipos de materiais ricos em sílica e/ou alumina maioritariamente produzidos em Portugal.

Concluiu-se da análise dos resultados obtidos que a reatividade dos materiais pozolânicos depende, para além da superfície específica, da composição química e mineralógica. Relativamente ao tipo de ensaio de avaliação de reatividade a aplicar, concluiu-se que a escolha depende da finalidade da aplicação duma determinada pozolana. Assim, o ensaio Chapelle é o mais indicado quando se pretende apenas estudar a viabilidade de utilização de um determinado material como pozolana; já o ensaio normalizado de Fratini será mais adequado para o estudo específico de ligantes pozolânicos; o ensaio do Índice de Atividade é o mais adequado quando é fundamental determinar as resistências mecânicas de argamassas e betões produzidos com pozolanas.

1. INTRODUÇÃO

As pozolanas são materiais siliciosos ou alumino-siliciosos amorfos que por si só não têm qualquer propriedade aglomerante mas que, quando utilizadas em conjunto com ligantes hidráulicos e/ou aéreos, juntamente com água, vão originar compostos de grande estabilidade e com propriedades aglomerantes.

As pozolanas podem agrupar-se em dois grandes grupos - as naturais e as artificiais (Fig. 1).

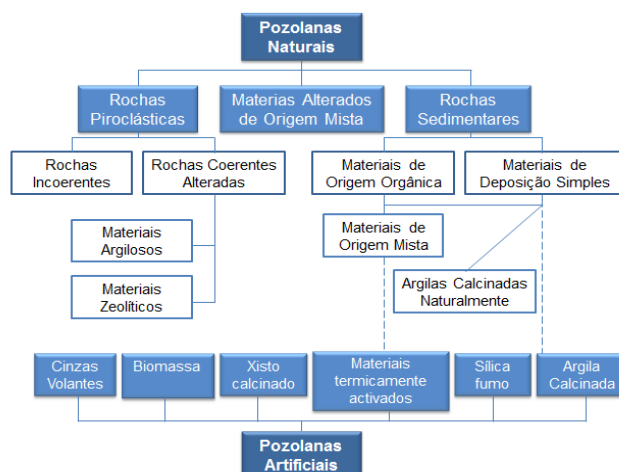


Figura 1. Classificação das pozolanas [1].

Como se pode depreender pela Fig.1, existem diferentes fontes de obtenção de pozolanas; no entanto, a utilização de subprodutos industriais como as cinzas volantes ou mesmo a biomassa, entre outros possíveis, traz uma mais-valia ambiental, visto que se podem incorporar estes subprodutos no processo produtivo, como materiais de construção, não havendo necessidade de os depositar em aterro. Quando utilizados em substituição parcial dos ligantes, reduz-se o consumo de matérias-primas e de combustíveis necessários para a produção destes ligantes.

A aplicação de pozolanas melhora o comportamento das argamassas, e em particular das de cal aérea, tanto ao nível mecânico como de aplicabilidade e durabilidade. A introdução de pozolanas em argamassas de cal aérea confere a estas características hidráulicas, que possibilitam que endureçam mesmo em condições de elevada humidade relativa e fraco contacto com o dióxido de carbono do ambiente, e melhoram a sua resistência mecânica [2]. Verificou-se também que as pozolanas podem melhorar o comportamento das argamassas ao nível da permeabilidade à humidade, assim como a aderência ao suporte. Relativamente à resistência aos sais [3], muito frequentes em edifícios antigos, verifica-se que a sua aplicação contribui para uma maior resistência e durabilidade aqueles agentes. Também em argamassas com base em cal hidráulica natural [4] se verifica que as pozolanas podem contribuir para a melhoria do comportamento mecânico e resistência à ação da água. Melhoram ainda o comportamento de argamassas e betões a ataque químico, nomeadamente permitem inibir ou mitigar reacções expansivas, como a reacção álcalis-silica (RAS) ou mesmo a reacção sulfática interna (RSI) [5,6].

A reatividade das pozolanas é influenciada pela sua composição química e fase amorfa, e pela sua superfície específica [1].

Devido à natureza das pozolanas e à sua reatividade com os ligantes foram desenvolvidos diferentes métodos de análise de reatividade, nomeadamente mecânicos, como é o caso do Índice de atividade (IA) [7, 8], e químicos, como são o ensaio de Fratini [9] e o ensaio de Chapelle [10, 11]. Por vezes alguns destes métodos recorrem a métodos de caracterização sofisticados, como a análise termogravimétrica (TGA) e a análise por difração de raios X (XRD). Neste trabalho, que está inserido na dis-

sertação de mestrado desenvolvida pelo primeiro autor [12], pretende-se apresentar uma análise comparativa entre vários métodos de avaliação da reatividade pozolânica, sinalizando os pontos fortes e fracos, de modo contribuir para determinar qual o ensaio a utilizar tendo em conta o objetivo e as condicionantes que possam existir.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados e sua caracterização, assim como os ensaios realizados.

2.1. Materiais

Para a realização deste trabalho foram utilizadas oito materiais diferentes com potencialidade e características pozolânicas: três metacaulinos (MK1, MK2 e MK3), três cinzas (cinza de casca de arroz CCA, cinza de biomassa CB e cinza de casca de eucalipto CE), um pó de argila expandida (AE) e um pó de vidro (V). A composição e superfície específica de Blaine dos materiais estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química (% em massa) e superfície específica (Blaine) dos materiais ensaiados

Designação	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Perda ao Rubro	Blaine (cm ² /g)
MK1	55,00	39,00	1,80	0,60		1,00		1,50	1,00	33760
MK2	53,25	31,96	7,14	3,41	0,16	0,20	0,67	3,22	-	6130
MK3	52,17	44,50	0,45	0,01	n.d.	n.d.	0,15	1,42	1,42	9310
AE	46,05	16,22	15,20	0,37	9,07	14,40	3,67	1,02	-	6010
CV	53,22	23,20	5,85	5,36	1,63	0,44	1,42	-	5,16	4090
CCA	68,08	1,80	0,11	0,42	10,21		1,36	n.d.	17,98	7020
CB	25,10	0,07	5,18	40,10	6,63	3,61	2,07	2,64	10,35	4820
CCE	19,12	5,90	2,33	36,32	6,12	0,29	1,03	0,36	22,72	12550
V	74,28	0,00	0,22	9,56	3,38	10,85	0,24	0,05	0,97	1560

Da tabela 1 pode-se obter o diagrama ternário Al₂O₃-CaO-SiO₂ que se apresenta na Fig. 2, em que se comparam os materiais em função da sua composição. Verifica-se que, à exceção do material CB e CCE que apresentam composições próximas do cimento e de produtos de hidratação, todos os restantes materiais se encontram próximo ou dentro de grupos pozolânicos característicos. Também se verifica que existe uma grande disparidade ao nível da área específica de cada material, sendo a mais elevada a do MK1, e a mais baixa a do pó de vidro V.

2.2. Métodos experimentais

Para a realização deste trabalho utilizaram-se quatro métodos experimentais de determinação da reatividade pozolânica: duas versões do ensaio de Chapelle, uma baseada na norma NF P 18-513 [10], designada por Chapelle, e outra de acordo com o relatório de Rey-Brot [11] (designada por Chapelle-LCPC); o ensaio de Índice de Atividade (IA), de acordo com a NP EN 450-1 [8] e NP EN 196-1 [7]; o ensaio de Fratini, de acordo com a NP EN 196-5 [9].

De modo a que fosse constante em todos os ensaios a razão ligante:pozolana, utilizou-se a mesma razão de 3:1 de acordo com a NP EN 450-1 [8], tendo sido para isso necessário alterar as composições impostas. Assim, no ensaio de Chapelle (norma) alterou-se a quantidade de cal de 2 para 3g, enquanto no ensaio de Fratini [9] foi usada uma mistura de 75g de cimento com 25g de material

pozolânico, de modo a manter a mesma razão ligante:pozolana para a quantidade total de 100g de material a estudar, conforme exigido pela norma.

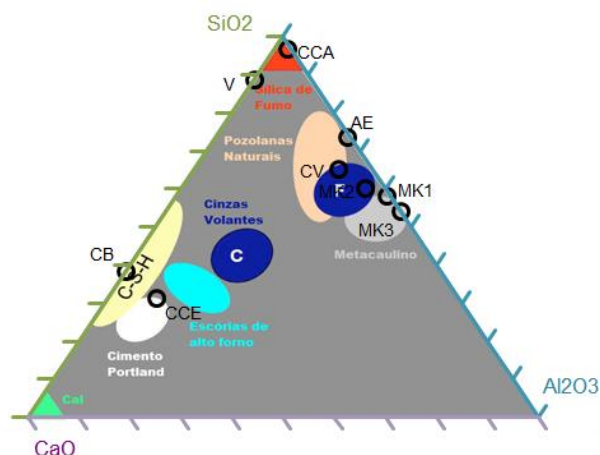


Figura 2. Diagrama ternário Al_2O_3 - CaO - SiO_2 com as diferentes composições das pozolanas em ensaio comparativamente a composições típicas [12]

3. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS EXPERIMENTAIS, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados, comparativamente, todos os métodos experimentais utilizados e as respectivas condicionantes, os resultados obtidos e as correlações obtidas.

3.1. Comparação entre os métodos de ensaio

As principais características de cada ensaio são descritas na Tabela 2:

Tabela 2. Resumo dos ensaios realizados de acordo com o tipo de ligante, duração e determinação

	Chapelle	Chapelle (LCPC)	Fratini	IA
Ligante	Cal	Cal	Cimento	Cimento
Duração	16 h	4 dias	8 ou 15 dias	28 e 90 dias
Determinação	Consumo de cal	Consumo de cal	Consumo de cal e OH^-	Resistência mecânica

Verifica-se que o ensaio de Chapelle é o mais rápido, já o ensaio de Chapelle (LCPC) tem a desvantagem de se medir o consumo de cal através de análise termogravimétrica (TGA). O método Chapelle (LCPC) tem contudo a vantagem de permitir medir o teor de cal presente na mistura, assim como avaliar a presença de compostos hidratados na reação; no entanto não é possível de ser utilizado em materiais muito ricos em sílica, como o pó de vidro que vitrifica com o aquecimento. O ensaio de Fratini é aplicável especificamente a cimentos pozolânicos, uma vez que a mistura (cimento + pozolana) utilizada assemelha-se a um cimento pozolânico POZ 75/25 [13]; o período de realização deste ensaio está entre uma a duas semanas. Este ensaio é mais complexo porque exige que o operador tenha conhecimentos químicos. O ensaio de IA utiliza maior quantidade de amostra e é o mais longo, uma vez que implica entre 4 semanas a 3 meses de cura dos provetes, exige também equipamento complexo (prensa para ensaios mecânicos), e o resultado obtido é dado pela relação entre a resistência obtida pelo material em ensaio comparativamente a uma mistura de referência.

3.2. Resultados individuais de cada ensaio

Nas Figuras 3 a 6 apresentam-se os resultados de reatividade pozolânica obtida em cada ensaio. Segundo o ensaio de Chapelle (Fig. 3) o MK1 é o material com maior reatividade (único material que atinge o valor de referência da norma), ao passo que o CCE é o menos reactivo de todos. Quando se comparam os resultados obtidos para cinzas (CV, CCA, CCE e CB), verifica-se que o ensaio é mais influenciado pela composição química que pela superfície específica.

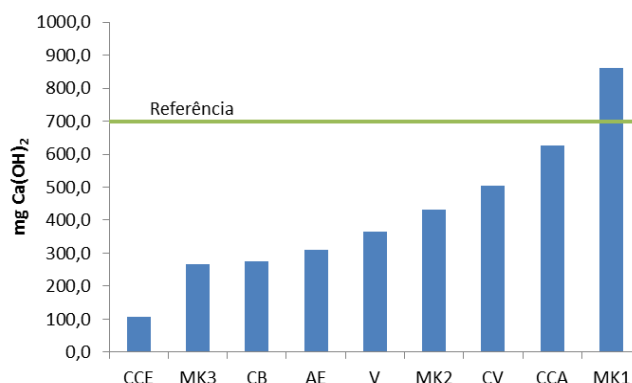


Figura 3. Resultados obtidos no ensaio de Chapelle e comparação do consumo de cal com o valor de referência da norma NF 18-513

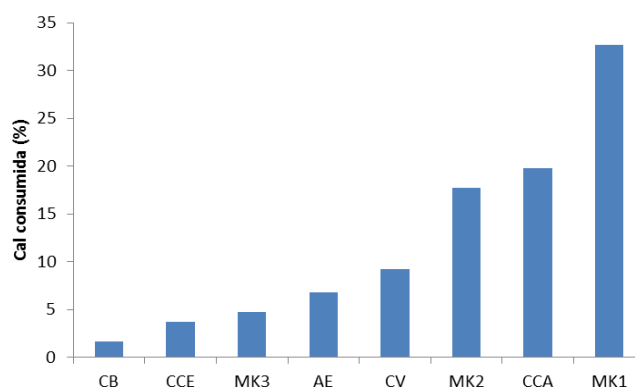


Figura 4. Resultados obtidos no ensaio de Chapelle (LCPC)

Analisando os resultados do ensaio de Chapelle (LCPC) (Fig. 4) verifica-se que o MK1 continua a ser o mais reactivo dos materiais ensaiados, enquanto a CB é agora o material menos reactivo. Comparado os resultados deste ensaio com os dados da tabela 1 verifica-se que aparenta ter em conta, não só a composição química, como também a superfície específica. Veja-se o caso das cinzas CCE e CB, que apresentam composições similares mas superfícies específicas diferentes e resultados de reatividade em consonância com essa diferença. Também o caso das cinzas CCA e CV, ou mesmo dos metacaulinos MK1 e MK2, que apresentam valores diferentes, apresentando composições próximas mas superfícies específicas diferentes.

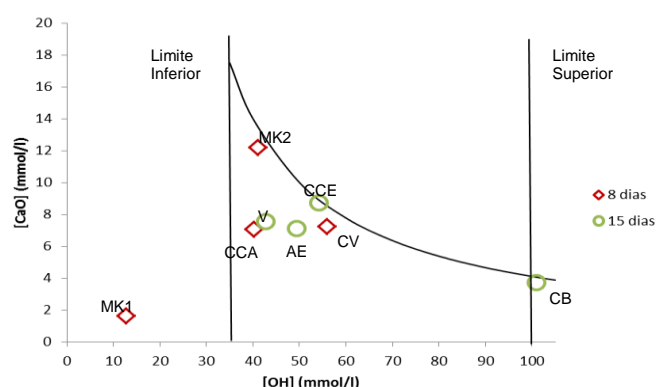


Figura 5. Resultados do ensaio de Fratini

Dos resultados obtidos a partir do ensaio de Fratini (Fig. 5) verifica-se que as cinzas CCE e CB, embora estando próximas da linha de solubilidade do CaO, consideram-se materiais não pozolânicos. No lado oposto temos o MK1, que obteve valores que ficam fora dos limites determinados pela norma, não considerado assim de pozolana, enquanto os restantes foram considerados pozolânicos. Os resultados obtidos têm em conta a mistura feita especificamente para este ensaio de 75:25 de cimento:pozolana, presumindo-se que se obtenham diferentes valores com outras razões.



Figura 6. Resultados do ensaio de Índice de Atividade aos 28 e 90 dias

No ensaio do IA (Fig. 6) verifica-se que os metacaulinos MK1 e MK2, assim como a cinza CV, são considerados pozolânicos. De notar que a CV tem uma reatividade retardada, dada a grande variação registada entre os resultados dos 28 e 90 dias.

3.3. Comparação de resultados

Comparando os resultados obtidos através dos dois ensaios de Chapelle (Fig. 7) verifica-se que existe alguma semelhança entre os resultados nos dois métodos, exceção feita para CB, ou CV, que apresentam um melhor comportamento na versão original do método Chapelle. Estas variações podem ficar a dever-se ao diferente tempo reacional (16h no primeiro método e 4 dias no segundo método LCPC), ou à temperatura dos ensaios ($\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$). Quer o tempo de ensaio como a temperatura são fatores que influenciam os resultados de reatividade pozolânica.

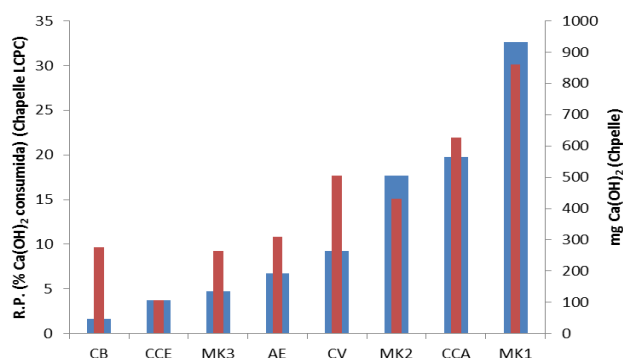


Figura 7. Resultados pelos métodos Chapelle: versão norma (vermelho) e versão LCPC (azul)

Comparando o resultado do ensaio de Chapelle com o ensaio de Fratini, obtiveram-se os resultados expressos nas Figuras 8 a 11. Verifica-se que os materiais pozolânicos cujo tempo de reação foi menor (8 dias) apresentaram maior linearidade, tanto quando comparados com a concentração de CaO residual, como com a concentração de OH⁻. Esta situação não se verificou para os materiais que necessitaram de maior tempo reacional (15 dias).

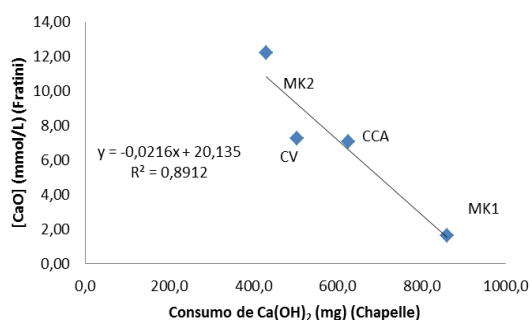


Figura 8. Relação entre o consumo de cal no ensaio de Chapelle vs concentração de CaO aos 8 dias no ensaio de Fratini

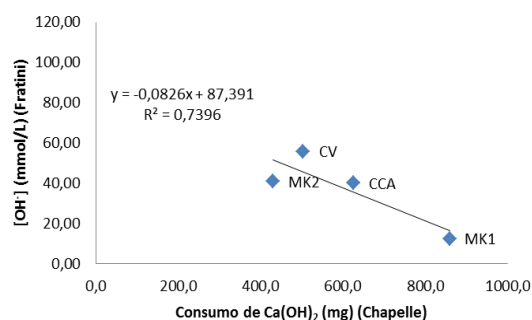


Figura 9. Relação entre o consumo de cal no ensaio de Chapelle vs concentração de OH⁻ aos 8 dias no ensaio de Fratini

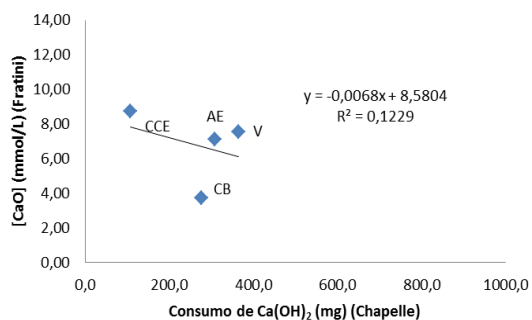


Figura 10. Relação entre o consumo de cal no ensaio de Chapelle vs concentração de CaO aos 15 dias no ensaio de Fratini

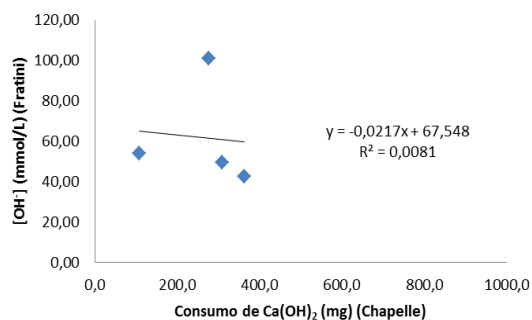


Figura 11. Relação entre consumo de cal no ensaio de Chapelle vs concentração de OH⁻ aos 15 dias no ensaio de Fratini

Comparando os resultados de Chapelle com os do ensaio de IA (Figuras 12 e 13) verifica-se que

existe alguma linearidade entre os resultados de Chapelle e os resultados de IA aos 28 dias, situação que não se repete para os resultados de IA aos 90 dias. Esta situação parece indicar que os resultados do ensaio de Chapelle se correlacionam melhor com os resultados do IA aos 28 dias, pois no Chapelle é usado um tempo reacional mais curto, o que, em termos comparativos, é mais aferidor do ganho de resistência mecânica aos 28 dias de argamassas com pozolanas.

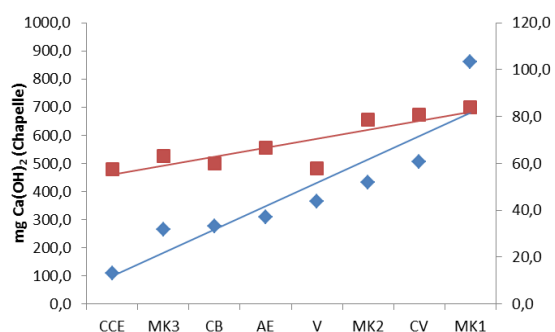


Figura 12. Relação entre o consumo de cal no ensaio Chapelle (azul) vs IA aos 28 dias (vermelho)

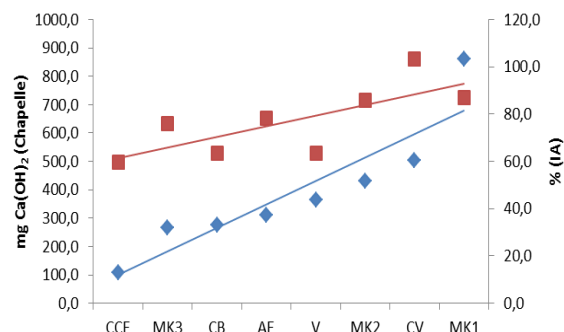


Figura 13. Relação entre o consumo de cal no ensaio Chapelle (azul) vs IA aos 90 dias (vermelho)

Analisando os resultados do ensaio de Chapelle (LCPC) com o ensaio de Fratini (Figuras 14 a 17) verifica-se que existe uma boa correlação entre os resultados do ensaio de Chapelle (LCPC) e os resultados da concentração residual de ião OH^- , quer aos 8, quer aos 15 dias.

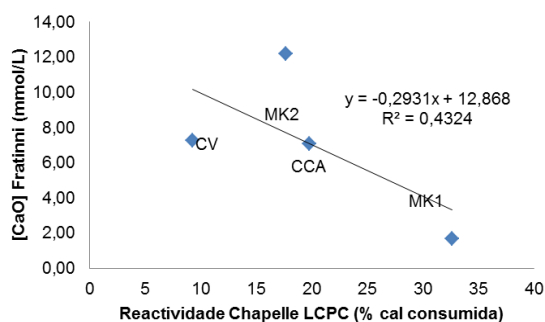


Figura 14. Reactividade pelo ensaio de Chapelle LCPC vs a concentração de CaO detectada em solução por titulação aos 8 dias no ensaio de Fratini

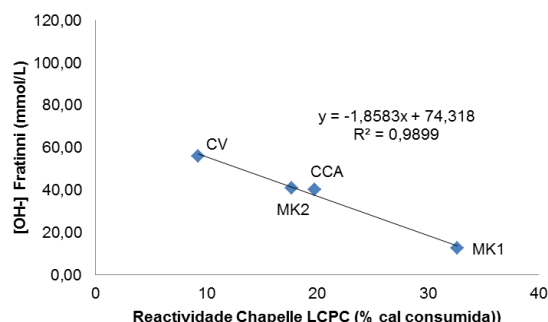


Figura 15. Reactividade pelo ensaio de Chapelle LCPC vs a concentração de OH^- detectada em solução por titulação aos 8 dias no ensaio de Fratini

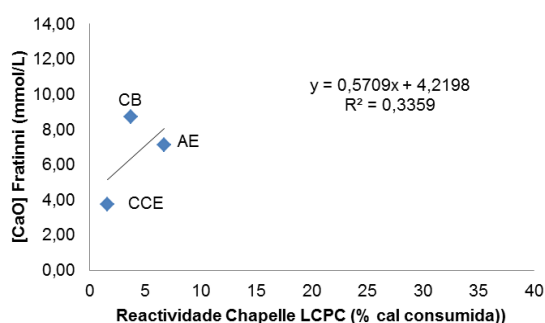


Figura 16. Reactividade pelo ensaio de Chapelle LCPC vs a concentração de CaO detectada em solução por titulação aos 15 dias no ensaio de Fratini

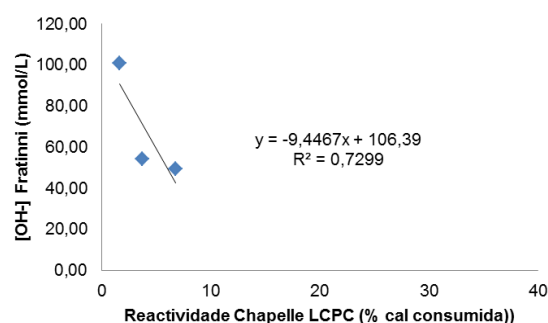


Figura 17. Reactividade pelo ensaio de Chapelle LCPC vs a concentração de OH⁻ detectada em solução por titulação aos 15 dias no ensaio de Fratini

Analisando os resultados do ensaio de Chapelle (LCPC) com o ensaio de IA (Figuras 18 e 19) observa-se que existe um comportamento similar no ensaio de Chapelle (LCPC) e no ensaio de IA aos 28 dias. Também o mesmo comportamento se verifica aos 90 dias; no entanto, nem todos os materiais se comportam linearmente, sendo que a cinza CV apresenta um desvio ao comportamento global, facto que se atribui à reatividade lenta da CV no ensaio de IA.

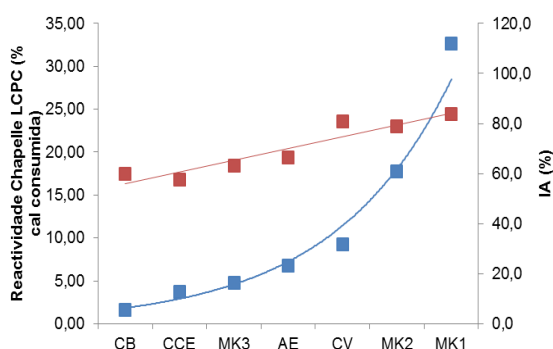


Figura 18. Comparação entre os resultados do ensaio de Chapelle (LCPC) (azul) e os do ensaio de IA a 28 dias

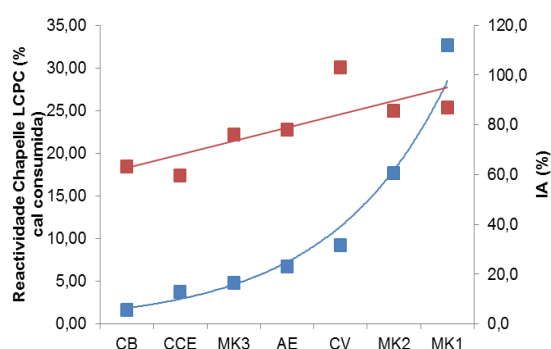


Figura 19. Comparação entre os resultados do ensaio de Chapelle (LCPC) (azul) e os do ensaio de IA a 90 dias

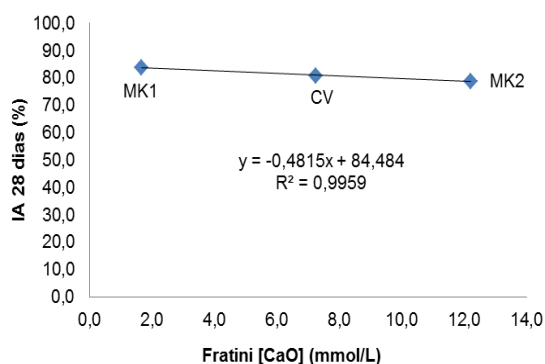


Figura 20. Comparação de resultados entre os ensaios de IA aos 28 dias e os da concentração de CaO para o ensaio Fratini aos 8 dias

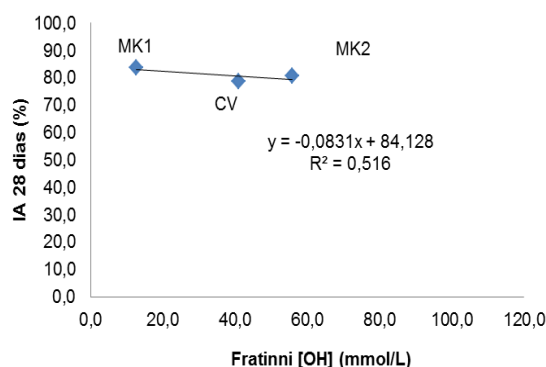


Figura 21. Comparação de resultados entre os ensaios de IA aos 28 dias e os da concentração de OH⁻ para o ensaio Fratini aos 8 dias

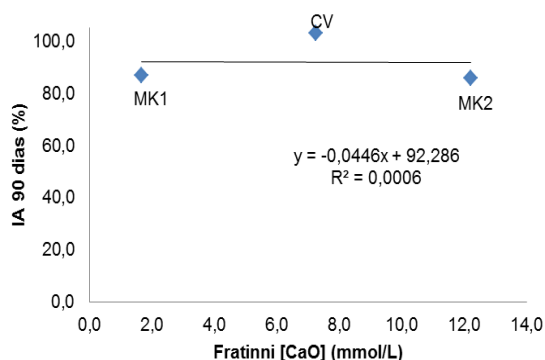


Figura 22. Comparação de resultados entre os ensaios de IA aos 90 dias e os da concentração de CaO para o ensaio Fratini aos 8 dias

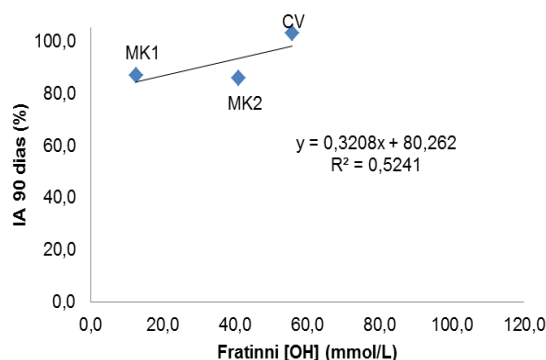


Figura 23. Comparação de resultados entre os ensaios de IA aos 90 dias e os da concentração de OH⁻ para o ensaio Fratini aos 8 dias

Finalmente, comparando o ensaio de Fratini com o ensaio de IA aos 28 e 90 dias (Figuras 20 a 23), pode-se verificar que existe uma correlação entre a concentração residual de cal pelo ensaio de Fratini aos 8 dias e os valores de IA para os 28 dias, situação que não se repete com os valores de 90 dias do ensaio de IA. Relativamente à relação entre a concentração de OH⁻ e o IA aos 28 e 90 dias, os valores não são conclusivos.

Comparando os resultados do ensaio de Fratini aos 15 dias com os do ensaio de IA aos 28 e 90 dias (Figuras 24 a 27) pode-se verificar que não existe relação entre resultados.

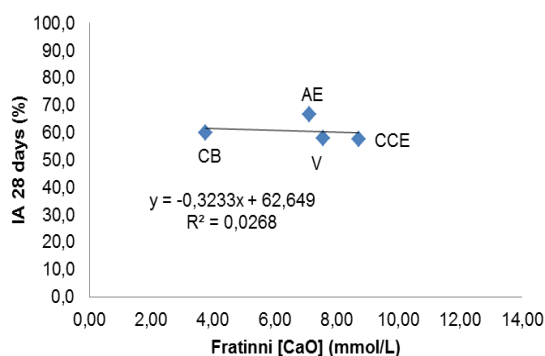


Figura 24. Comparação de resultados entre os ensaios de IA aos 28 dias e os da concentração de CaO para o ensaio Frattini aos 15 dias

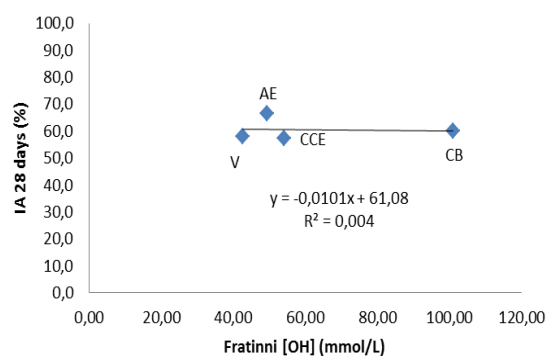


Figura 25. Comparação de resultados entre os ensaios de IA aos 28 dias e os da concentração de OH para o ensaio Frattini aos 15 dias

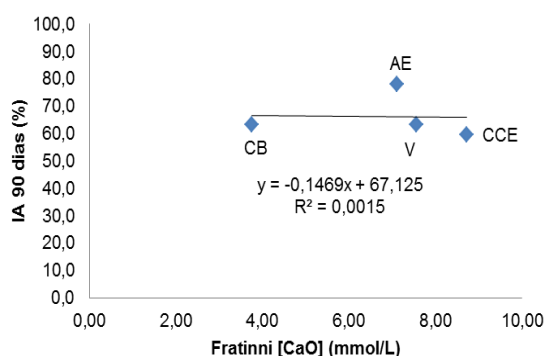


Figura 26. Comparação de resultados entre os ensaios de IA aos 90 dias e os da concentração de CaO para o ensaio Frattini aos 15 dias

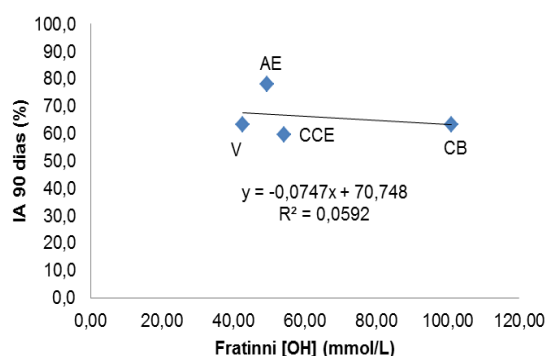


Figura 27. Comparação de resultados entre os ensaios de IA aos 90 dias e os da concentração de OH para o ensaio Frattini aos 15 dias

4. CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu retirar as seguintes conclusões:

- A classificação da reatividade pozolânica é dependente do tipo de ensaio considerado, e essa está por sua vez dependente da composição e superfície específica do material.
- O ensaio de Chapelle normalizado é entre todos o mais rápido e apresenta uma boa correlação com o valor de IA aos 28 dias.
- O ensaio de Frattini é particularmente indicado para a avaliação de cimentos pozolânicos ou misturas de cimento e pozolana. Os seus resultados aos 8 dias apresentam uma boa correlação com os do ensaio Chapelle normalizado.
- O ensaio de IA, que foi desenvolvido para a avaliação das características das cinzas volantes, parece ser aplicável a materiais de composição e características diferentes.

Em resumo, relativamente aos métodos de ensaio, embora como já foi concluído anteriormente, se tenha verificado que qualquer um permite caracterizar os materiais, a sua escolha depende do objetivo pretendido. Se for um produtor de pozolanas, é aconselhado usar o ensaio de Chapelle, que é rápido, fácil, económico, e permite obter valores que podem indicar o nível de comportamento pozolânico. Se for um produtor de cimento pozolânico, o mais fácil será o ensaio de Frattini, visto que, através do uso de diferentes misturas, indica qual a melhor mistura entre cimento e a pozolana a utili-

zar, e se esta é pozolânica ou não. Finalmente, para um projetista, o melhor resultado continua a ser o Índice de Actividade, visto que fornece valores de resistências mecânicas, que ajudam a conceber as dimensões das peças de betão a usar em obra e a especificar traços e condições de aplicação de argamassas.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se o apoio do LNEC através dos projetos *Materiais com interesse histórico. Durabilidade e caracterização* e *Durabilidade do betão. Especificação e avaliação*. Os autores agradecem ainda o financiamento da FCT ao projeto METACAL (PTDC/ECM/1001431/2008).

REFERÊNCIAS

- [1] F. Massazza, *Pozzolanitic cements*. Cement & Concrete composites 15, pp. 185-214, England, Elsevier (1993)
- [2] M. Rosário Veiga, A. Velosa, A. Magalhães, *Experimental applications of mortars with pozzolanitic additions: Characterization and performance evaluation*. Construction and building materials 23 (1), pp. 318-327, Elsevier (2009)
- [3] P. Faria-Rodrigues, *Resistance to salts of lime and pozzolan mortars*. RILEM Proceedings pro 067 – International RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry, C.Groot, Ed., pp.99-110, RILEM Publications on-line (2009)
- [4] P. Faria, V. Silva, J. Grilo, J. Carneiro, T. Branco, D. Mergulhão, R. Antunes, Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural. CIRea2012, Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria, Universidade Nova de Lisboa, pp. 29-38 (2012)
- [5] A. Santos Silva, D. Soares, L. Matos, M. Salta, A. Bettencourt Ribeiro, A. Gonçalves, *Reacções expansivas internas do betão: mitigação da expansão pelo emprego de adições minerais*. BE2010- Encontro nacional de betão estrutural, Lisboa (2010)
- [6] A. Santos Silva, D. Soares, L. Matos, M. Salta, *Inhibition of internal expansive reactions in cement based materials with mineral additions*. Medachs, LaRoche (2010)
- [7] Instituto Português da Qualidade (IPQ), *NP EN 196-1:2006 Métodos de ensaio de cimentos parte 1: Determinação das resistências mecânicas*. Lisboa (2006)
- [8] IPQ, *NP EN 450-1:2005+A1:2008 Cinzas volantes para betão parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade*. Lisboa (2008)
- [9] IPQ, *NP EN 196-5:2006 Métodos de ensaio de cimentos parte 5: Ensaio de pozolanicidade dos cimentos pozolânicos*. Lisboa (2006)
- [10] AFNOR, *NF P 18-513 – Metakaolin addition pouzzolanique pour bétons – Définitions, spécifications, critères de conformité*. Paris (2010)
- [11] A. Rey-Brot, *Étude de la réaction pouzzolanique des fumées de silice*. Rapport de stage de 3^{ème} année d'IUP Génie des Matériaux du LCPC à Evry, Evry (2003)
- [12] http://www.ifb.ethz.ch/education/bachelor_werkstoffe1/Concrete_lecture_v2.pdf
- [13] IPQ, *NP EN 4220:2010 Pozolanas para betão, argamassa e caldas. Definições, requisitos e verificação de conformidade*. Lisboa (2010)
- [14] J. Pontes, *Reactividade de pozolanas para argamassas e betões*. Dissertação em Engenharia Civil, FCT-UNL (2011)